

05,08

## Исследование распространения спиновых волн в системе гофрированный волновод—планарный волновод при изменении параметров модуляции

© В.А. Губанов, А.В. Кострикин, А.В. Садовников

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
Саратов, Россия

E-mail: vladmeen@gmail.com

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Методом микромагнитного моделирования исследовано влияние параметра заполнения периода в латеральной системе планарный волновод/гофрированный волновод. Показаны режимы переключения распространения спиновых волн в выходные порты. При добавлении в систему дефектной области — области без периодичности — спектр прохождения изменяется, и появляются дополнительные частотные области пропускания волны. На основе полученных результатов возможно создание направленного ответвителя, применимого для устройств обработки информационных сигналов на принципах магноники.

**Ключевые слова:** спиновые волны, магноники, дефект, ферромагнетик, глубина канавок.

DOI: 10.21883/FTT.2023.07.55840.43H

### 1. Введение

В настоящее время большой интерес представляет создание базы комплементарных элементов межсоединений на принципах магноники [1] для реализации новых устройств обработки информационных сигналов. В роли переносчиков информации выступают спиновые волны (СВ) [2]. Высокая вариативность соединения элементарных магнитных блоков позволяют создавать целый ряд функциональных блоков [3].

Оптимальной средой для распространения СВ является ферромагнитная пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), которая отличается рекордно низким параметром затухания [4]. Пленки ЖИГ могут быть получены методами жидкофазной эпитаксии [5] либо техникой лазерного осаждения [6]. При этом минимальные значения толщин пленок, пригодные для распространения СВ, могут достигать десятков нанометров.

Управление спиновой волной возможно производить при помощи изменения таких параметров системы, как направлением и величиной внешнего магнитного поля, изменением частоты и мощности возбуждаемого в системе СВ-сигнала, а также введением в систему дополнительных управляющих параметров — приложения деформаций [7], наведением лазерного излучения [8], наложением на ферромагнитный волновод металлизированных поверхностей.

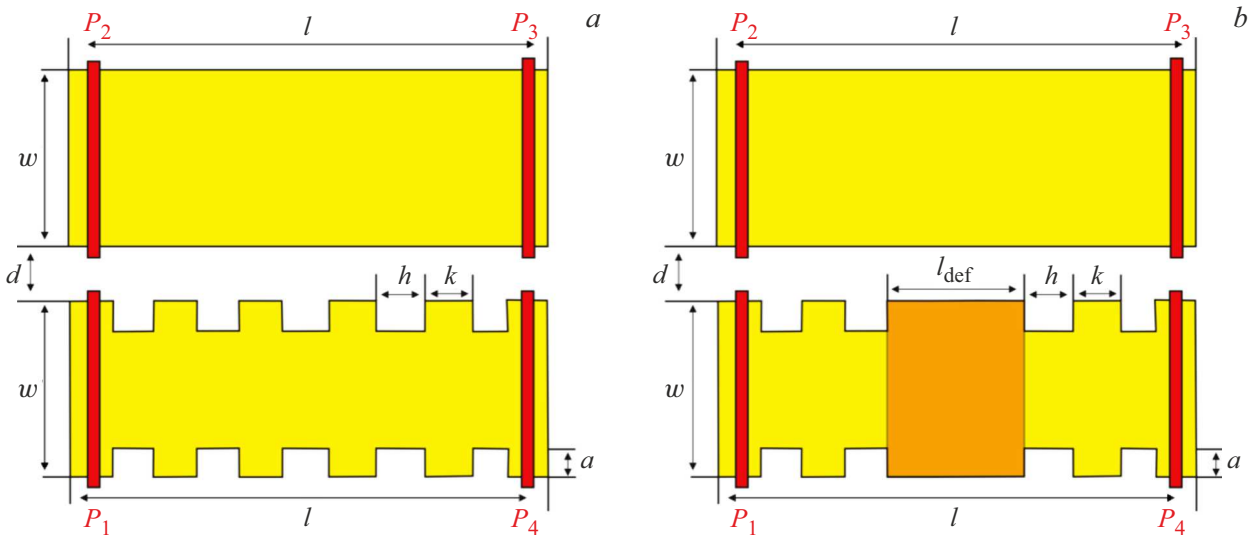
Также одним из вариантов управления параметрами СВ является создание неоднородного профиля волноведущей структуры. К примеру — создание периодических неоднородностей, образуя магнонные кристаллы (периодические условия изменения профиля вдоль толщины волноведущей структуры) или гофрированные

волноводы (периодические условия изменения профиля по ширине волновода) [9]. При этом в зависимости от геометрических параметров периода и частоты возбуждения спин-волнового сигнала будут возникать условия, при которых падающая и отраженные волны в области периодичности будут находиться в противофазе, приводящие к гашению распространения спиновых волн.

В настоящей работе будут рассмотрены с помощью метода микромагнитного моделирования режимы распространения СВ в системе связанных волноведущих структур, одним из которых является планарный волновод, а второй — гофрированный волновод без дефектной зоны и с дефектной зоной. Будут исследованы режимы перераспределения мощности СВ между выходными портами связанной структуры. Данная структура может использоваться как направленный ответвитель спин-волнового сигнала для создания устройств обработки СВЧ-сигнала на принципах магноники.

### 2. Исследуемые структуры и методика численного моделирования

Исследуемая структура представляет собой систему латерально связанных волноводов — планарный волновод и гофрированный волновод с одинаковой шириной (представлена на рис. 1, *a*) с параметрами для пленки ЖИГ: намагниченностью насыщения  $M_0 = 139$  G. В гофрированном волноводе создавалась область без периодичности, далее по тексту называемая дефектом, которая изображена на рис. 1, *b* и выделена оранжевым цветом. Длина дефектного сегмента составляла  $l_{\text{def}} = 1000$   $\mu\text{m}$ .



**Рис. 1.** Изображение исследуемой латеральной структуры планарный волновод/гофрированный волновод без добавления дефектной области (a) и при добавлении в область гофрированного волновода дефектной области (b).

Данные связанные волноводы имеет следующие параметры: длина структуры  $l = 6000 \mu\text{m}$ , ширина структуры  $w = 500 \mu\text{m}$ , глубина канавки  $a$  изменялась от 40 до  $60 \mu\text{m}$ , толщина волноводов составляла  $t = 10 \mu\text{m}$ . Волноведущие структуры располагались вдоль длинной оси волновода и расстояние между ними составляла  $d = 15 \mu\text{m}$ .

Для данной структуры производилась оптимизация параметра перекрытия  $L = h + k$ , где  $k$  — длина „гребня“ гофры, а  $h$  — длина канавки. В дальнейшем рассмотрении параметр перекрытия был равен  $L = 160 \mu\text{m}$  ( $h = 80 \mu\text{m}$ ,  $k = 80 \mu\text{m}$ ).

В микромагнитном моделировании создавались условия для возбуждения поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ), при котором внешнее магнитное поле  $H_0$  величиной  $1200 \text{ Oe}$  прикладывалось вдоль оси  $y$ .

Рассматриваемая система волноведущих структур обладает 4 портами, которые располагались по всей ширине каждого из волноводов. Порт  $P_1$  выступал в роли входного микрополоска, на которой возбуждалась спиновая волна. Порты  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$  выступали приемниками распространяющихся спиновых волн. Ширины данных антенн были равны  $30 \mu\text{m}$ .

Исследование проводилось в программном пакете MuMax<sup>3</sup> [10], в котором моделируемая структура разбивалась сеткой  $1024 \times 256 \times 1$  (D×Ш×Г), в узлах которой численно решалось уравнение Ландау–Лифшица с затуханием Гильберта [11,12]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma [\mathbf{H}_{\text{eff}} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha}{M_s(x,y)} \left[ \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right], \quad (1)$$

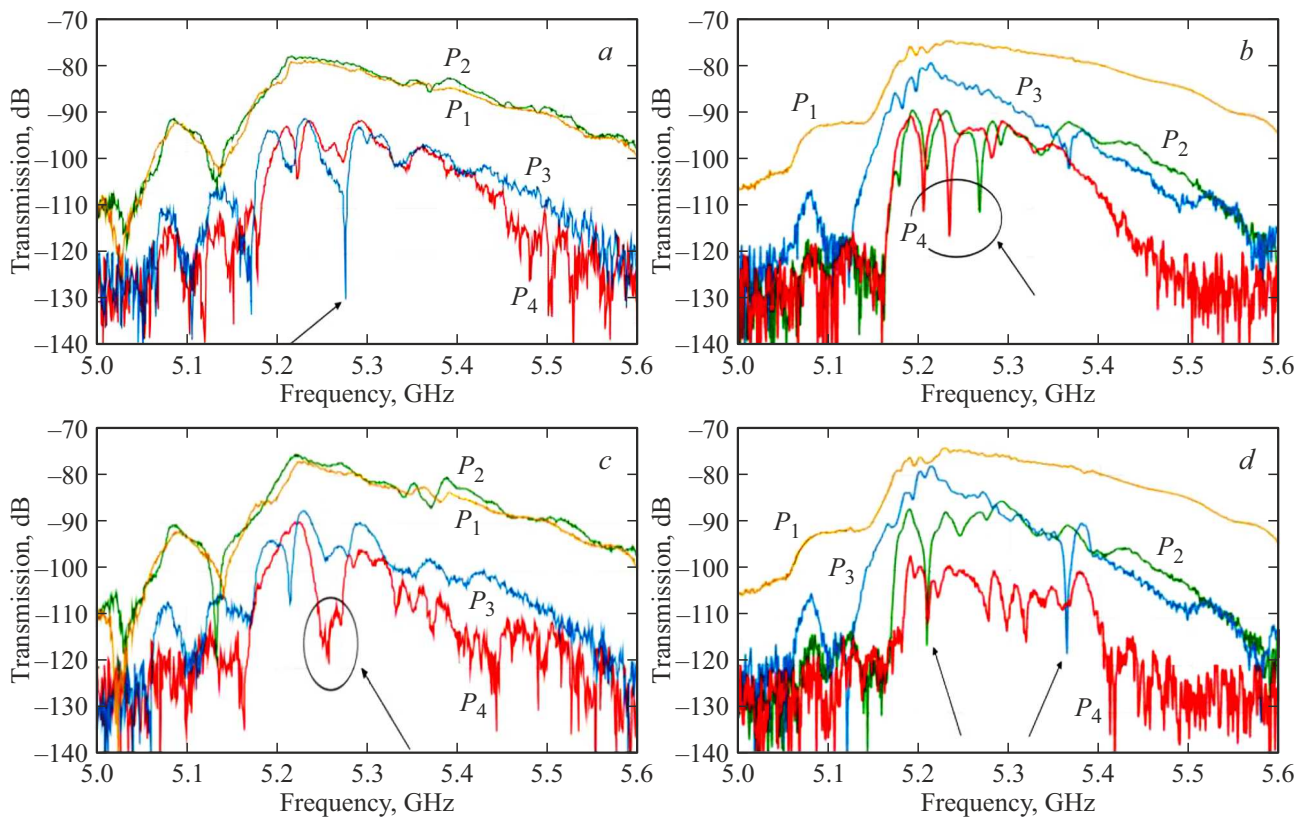
где  $\mathbf{M}$  — вектор намагниченности,  $\alpha = 10^{-5}$  — параметр затухания пленки ЖИГ,  $\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{\text{demag}} + \mathbf{H}_{\text{ex}} + \mathbf{H}_a$  — эффективное магнитное поле,  $\mathbf{H}_0$  — внешнее магнитное

поле,  $\mathbf{H}_{\text{demag}}$  — поле размагничивания,  $\mathbf{H}_{\text{ex}}$  — обменное поле,  $\mathbf{H}_a$  — поле анизотропии,  $\gamma = 2.8 \text{ MHz/Oe}$  — гиромангнитное отношение. Возбуждение спиновой волны производилось в следующем виде:  $h_z(t) = h_0 \text{ sinc}(2\pi f t)$ , где  $f$  — частота возбуждения спиновой волны,  $h_0 = 0.1 \text{ Oe}$ . Затем значение динамической намагниченности  $m_z(x, y, t)$  в областях выходных антенн  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  записывалось с шагом  $\Delta t = 75 \text{ fs}$  в течении  $t = 200 \text{ ns}$ . И в дальнейшем по полученным данным проводились одномерные преобразования Фурье, в результате которых были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) распространяющихся спиновых волн.

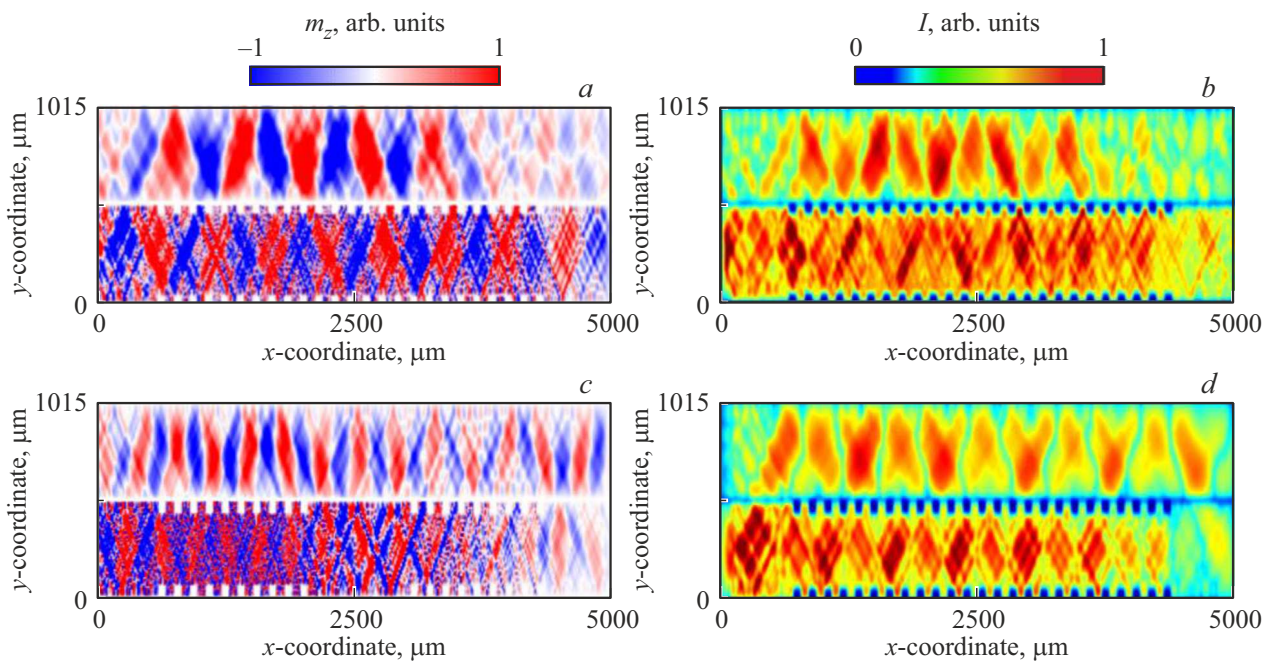
На рис. 2 представлены (АЧХ) для случаев параметра  $a = 40 \mu\text{m}$  (рис. 2, a) и параметра  $a = 60 \mu\text{m}$  (рис. 2, c) (без введения в систему дефектной области  $l_{\text{def}}$ ) и для случаев параметра  $a = 40 \mu\text{m}$  (рис. 2, b) и параметра  $a = 60 \mu\text{m}$  (рис. 2, d) (при введении в систему дефектной области  $l_{\text{def}}$ ). Для получения АЧХ в моделируемой структуре на входной порт  $P_1$  (коричневая) подавался сигнал, а на выходных портах  $P_2$  (зеленая линия),  $P_3$  (синяя линия) и  $P_4$  (красная линия) снимался.

Из данных АЧХ можно сделать вывод, что передаточные характеристики трансформируются, при которых наблюдается смещение частотных диапазонов с провалами. При этом только при изменении параметра глубины гофрированного волновода  $a$  с 40 до  $60 \mu\text{m}$  в частотном диапазоне 5.22–5.3 GHz происходит перераспределение мощности спиновой волны в выходной порт  $P_3$  в выходной порт  $P_4$ .

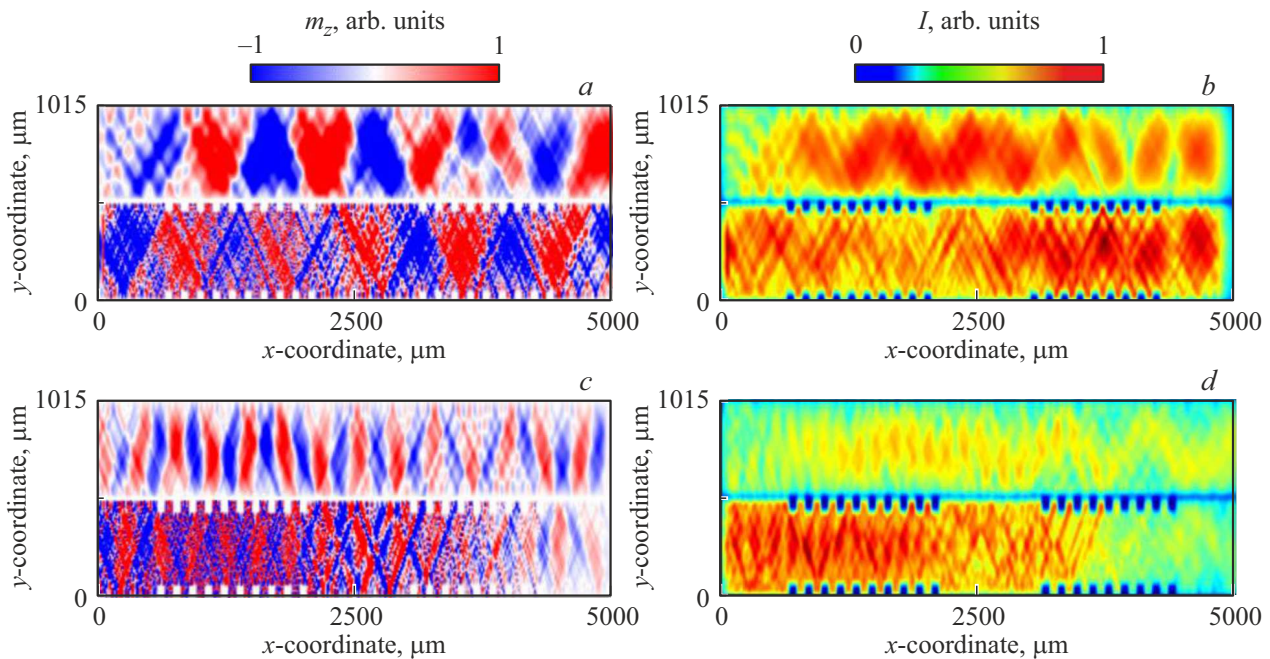
Для случая введения дефектной области в гофрированной волноведущей структуре на АЧХ (рис. 2, b, d) при изменении параметра глубины гофрированного волновода  $a$  с 40 до  $60 \mu\text{m}$  наблюдается уширение частотной области перестройки с  $\Delta f = 80$  до  $170 \text{ MHz}$  (диапазон 5.21–5.38 GHz).



**Рис. 2.** Амплитудно-частотные характеристики для случаев параметра  $a = 40 \mu\text{m}$  (рис. 2,а) и параметра  $a = 60 \mu\text{m}$  (рис. 2,с) без введения в систему дефектной области  $l_{\text{def}}$  и для случаев параметра  $a = 40 \mu\text{m}$  (рис. 2,б) и параметра  $a = 60 \mu\text{m}$  (рис. 2,д) при введении в систему дефектной области  $l_{\text{def}}$ . Для получения амплитудно-частотных характеристик в моделируемой структуре на входной порт  $P_1$  (коричневая линия) подавался сигнал, а на выходных портах  $P_2$  (зеленая линия),  $P_3$  (синяя линия) и  $P_4$  (красная линия) снимался.



**Рис. 3.** Пространственные карты распределения  $m_z$  компоненты намагниченности и интенсивности СВ в системе без дефектной области на частоте  $f = 5.28 \text{ GHz}$  (а, б) при параметре  $a = 40 \mu\text{m}$  и на при параметре  $a = 60 \mu\text{m}$  на частоте  $f = 5.25 \text{ GHz}$  (с, д).



**Рис. 4.** Пространственные карты распределения  $m_z$  компоненты намагниченности и интенсивности СВ в системе с дефектной областью на частоте  $f = 5.23$  GHz (*a, b*) при параметре  $a = 40 \mu\text{m}$  и на при параметре  $a = 60 \mu\text{m}$  на частоте  $f = 5.36$  GHz (*c, d*).

Для наблюдаемых на АЧХ провалов при помощи микромагнитного моделирования были построены пространственные карты распределения  $m_z$  компоненты и интенсивности спиновых волн  $I = \sqrt{m_z^2 + m_x^2}$  для рассмотренных случаев разного параметра  $a$  без добавления дефектной области (рис. 3) и при добавлении дефектной области (рис. 4).

На частоте  $f = 5.28$  GHz (рис. 3, *a, b*) при параметре  $a = 40 \mu\text{m}$  наблюдается режим, при котором спиновая волна перекачивается в планарный волновод и обратно перекачивается в гофрированный волновод. При этом в планарном волноводе возникают условия для распространения второй шириной моды спиновой волны.

При увеличении параметра  $a$  до  $60 \mu\text{m}$  на частоте  $f = 5.25$  GHz (рис. 3, *c, d*) реализуется режим переноса мощности спиновой волны и вывода через выходной порт  $P_3$ .

При введении в гофрированный волновод области дефекта при построении карт распределения  $m_z$  компоненты и интенсивности спиновой волны на частоте, характерной для провала, может реализоваться режим, при котором спиновая волна перераспределяется между выходными портами  $P_3$  и  $P_4$  (рис. 4, *a, b*) на частоте 5.23 GHz, либо перестает распространяться (рис. 4, *c, d*) на частоте 5.36 GHz, создавая условия для отражения СВ от границы дефекта.

### 3. Заключение

Таким образом, с помощью численного моделирования была исследована связанная структура планарный

волновод—гофрированный волновод. Были построены передаточные характеристики и пространственные карты распределения  $m_z$  — компоненты намагниченности и интенсивности спиновой волны, демонстрирующие режимы перераспределения мощности СВ. При добавлении в гофрированный волновод дефектной области без периодичности, в системе возникают дополнительные частоты для перенаправления мощности СВ. Данная структура может быть использована как направленный ответитель СВЧ-сигнала для создания устройств обработки информационных сигналов на принципах магнетики.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2023-0008).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S.A. Nikitov, D.V. Kalyabin, I.V. Lisenkov, A.N. Slavin, Y.N. Barabanenkov, S.A. Osokin, A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.A. Morozova, Y.P. Sharaevsky, Y.A. Filimonov, Y.V. Khivintsev, S.L. Vysotsky, V.K. Sakharov, E.S. Pavlov. Phys.-Usp. **58**, 1002 (2015).
- [2] V. Demidov, S. Urazhdin, G. de Loubens, O. Klein, V. Cros, A. Anane, S. Demokritov. Phys. Rep. **673**, 1 (2017).

- [3] C.S. Davies, A.V. Sadovnikov, S.V. Grishin, Y.P.Sharaevsky, S.A. Nikitov, V.V. Kruglyak. IEEE Transact. Magn. **51**, 1 (2015).
- [4] V. Cherepanov, I. Kolokolov, V. Lvov. Phys. Rep. **229**, 81 (1993).
- [5] C. Dubs, O. Surzhenko, R. Thomas, J. Osten, T. Schneider, K. Lenz, J. Grenzer, R. Hübner, E. Wendler. Phys. Rev. Mater. **4**, 024416 (2020).
- [6] L.V. Lutsev, A.M. Korovin, S.M. Suturen, L.S. Vlasenko, M.P. Volkov, N.S. Sokolov. J. Phys. D **53**, 265003 (2020).
- [7] V. Sadovnikov, A.A. Grachev, S.E. Sheshukova, Y.P. Sharaevskii, A.A. Serdobintsev, D.M. Mitin, S. A.Nikitov. Phys. Rev. Lett. **120**, 257203 (2018).
- [8] M. Vogel, A.V. Chumak, E.H. Waller, T. Langner, V.I. Vasyuchka, B. Hillebrands, G. von Freymann. Nature Phys. **11**, 487 (2015).
- [9] S. Nikitov, P. Tailhades, C. Tsai. J. Magn. Magn. Mater. **236**, 320 (2001).
- [10] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B.V. Waeyenberge. AIP Adv. **4**, 107133(2014)
- [11] L. Landau, E. Lifshitz. Phys. Z Sowj **8**, 153 (1935).
- [12] T.L. Gilbert, J.M. Kelly. American Institute of Electrical Engineers **253–263** (1955).

*Редактор Т.Н. Василевская*